

개루프 철심을 이용한 자속구속형 초전도한류기의 전압별 전류제한 특성분석

남금현, 최효상, 박형민, 조용선, 이나영, 임성훈*,
 조선대학교 전기공학과, 전북대학교 공업기술연구소*

Fault Current limiting Characteristics of Flux-Lock type Superconducting Fault Current Limiter with Open-loop Iron Core according to the Voltage Level

Gueng-Hyun Nam, Hyo-Sang Choi, Hyoung-Min Park, Yong-Sun Cho, Na-Young Lee, Sung-Hun Lim*
 Chosun Univ, Research center of Industrial Technology*

Abstract - Superconducting fault current limiter (SFCL) provides the effect such as enhancement in power system reliability due to limiting fault current in a few milliseconds. The flux-lock type SFCL among various type SFCLs consists of two coils wound on the same iron core and a component using the YBCO thin film. In the SFCL, operation characteristics can be controlled by adjusting the inductances and the winding directions of the coils. In this paper, we investigated the various fault current limiting characteristics according to the voltage level. To analyze the current limiting performance, we compared operational characteristics on the subtractive polarity winding direction on in case of open-loop iron core.

1. 서 론

전력계통내에 초전도 한류기를 적용할 경우 사고가 발생했을 때 초전도체에 임계전류 이상의 과도전류가 흘러 상전도체로 전이되는 켈치현상에 의해서 한류소자의 임피던스로 전력계통을 보호한다. 이는 계통내에 단락사고와 같은 예상치 못한 사고로 인하여 전체 임피던스의 감소로 야기되는 사고전류를 1cycle이내에 감지하여 선로로 흐르는 것을 신속하게 억제하여, 사고 종료 후 자동 복귀되는 것이다. 기존의 고장전류 저감대책은 인접계통에 과부하 및 안정성 저하와 같은 부작용을 유발시켰으며, 사고시 정전에 대한 대응책이 부족하였다. 따라서 초전도를 이용한 한류기의 도입은 현 실정에 부합되며, 또한 정상 작동시에는 높은 전류밀도로 인하여 전력손실이 거의 없기 때문에 미래사업적인 연구라 할 수 있다.

고온 초전도 한류기에 대한 연구는 저항형과 유도형, 브리지형 등으로 분류할 수 있는데, 이중 구조가 간단하여 소형화가 가능한 저항형은 국내 설치제약에 따른 문제점을 해결할 수 있는 한류기이며, 정상작동시 선로에 영향이 적어 효율성이 높은 특성이 있다.

본 논문에서는 저항형 한류기를 보완한 자속구속형 한류기에 대하여 YBCO박막과 개루프 강자성체 철심을 사용하여 감극결선을 분석하였다. 자속구속형 한류기는 사고시 과도전류가 코일 1과 한류소자에 양분되어 흐르기 때문에 저항형에 비해 소자파손이 적으며, 철심에 감는 코일로 인덕턴스를 조절하여 사고전류를 조절할 수 있고, 평상시에 철손손실이 적은 특징이 있다. 자속구속형 한류기의 동작특성을 세부적으로 파악하기 위하여 점진적인 전압별 증가에 따른 전류제한실험을 모의하였다. 초전도 한류기를 실제계에 적용하기 위해서는 설계파라미터에 따른 기초켈치 특성파악은 필수적이다. 이에 따라 사고발생시 여러 요인에 의하여 특정한 사고가 발생하지 않기 때문에 계통적용을 위한 초전도 한류기의 운전특성에 관한 실험은 중요하다.

2. 본 론

2.1 실험장치 구성

그림 1은 모의실험을 위해 구성한 자속구속형 초전도 한류기의 실험회로도이다. 실험에 사용된 한류소자로는 임계전류밀도가 약 23.4[A_{rms}]인 2inch의 YBCO박막(1 μ m/cm기준)이며, 액체질소가 담겨진 cryostat 내부에 넣어 코일 2와 직렬로 연결되어 있다. 구조는 개루프 강자성체 철심에 코일 1과 코일 2를 각각 60[mI]와 11[mI]가 되도록 결선하여, 선로에 병렬로 연결하였다. 코일의 결선방향에 따라 철심코어에서 발생하는 자속에 의해 감극과 가극결선이라 한다. 여기서 V_S는 360[V_{rms}]인 전원전압, 전체전류를 측정을 위한 표준부하 R₀은 1[Ω], R₁은 50[Ω]인 부하저항이다.

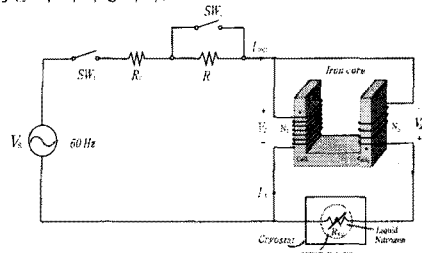


그림 1. 개루프 철심인 자속구속형의 실험회로도

스위치 SW₁를 닫은 후 일정시간이 후에 스위치 SW₂을 닫아 단락선로처럼 동작시켜, 사고를 모의하였다. 단락사고가 발생하면 한류소자에 켈치가 발생하여, 전압이 유기된다. 이에 의해 각 코일에 쇄교되어 있던 자속은 시간에 따른 변화가 생기게 되어 코일의 인덕턴스에 의한 전압도 유기되며, 사고전류를 신속하게 제한하게 된다. 이와 같은 동작은 철심에 대한 설계가 적절하지 않을 경우 사고 발생시 철심의 포화로 인해 발생하는 문제가 수반되므로 여러 설계파라미터에 의한 사고전류제한 특성을 비교분석함으로써 효과적인 한류기의 설계를 위한 자료로 활용하고자 한다.

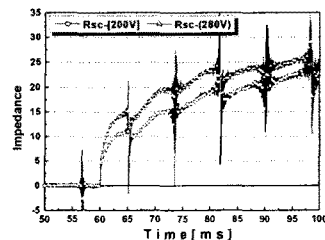


그림 2. 단위소자의 전원전압별 임피던스곡선

그림 2는 기초켄치특성에 대한 초전도한류기에서의 단위소자에서 발생하는 임피던스곡선을 나타낸다. 본 실험 조건과 동일하게 200[V_{rms}], 280[V_{rms}]의 전원을 인가시의 파형이다. 입력전원에 따른 초전도 한류기의 임피던스 발생곡선으로 전원전압이 증가함에 따라 켄치속도의 증가와 함께 상전도 저항이 증가됨을 확인할 수 있었다.

2.2 개루프 감극결선시 전압별 전류제한특성

그림 3은 자속구속형 전류제한기에 전원전압 200[V_{rms}] 인가시 사고각 0°에서 사고발생 직후의 초기 반주기 동안의 과도전압전류 파형을 나타낸 것이다.

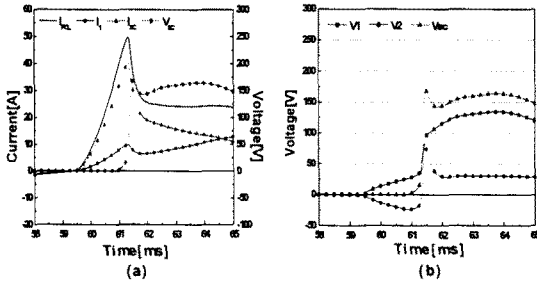


그림 3. 200[V]전압 인가시 사고발생 후 전류전압곡선
a) 전압전류곡선 b) 전압곡선

선로전류(I_{sc})가 임계전류를 넘는 순간부터 소자의 저항이 발생하여 한류소자 양단에 전압이 발생했음을 나타낸다. a)그림에서 입력전압에 따른 초전도 한류기의 동작으로 선로전류가 49.69[A]까지 상승하여 이내 제한되어 기존 페루프의 전류제한을 하는 동작특성면에서는 유사하였으나, 한류소자의 동작특성이 소자의 양단전압이 인가되어 최고 피크점까지 걸리는 응답시간이 좀더 소요되었다. 또한 코일 2에서 인가되는 전압에 곡선이 페루프에 비하여 개루프 철심의 공심에 의하여 나타나는 누설 자속 때문에 음의 방향으로 파형이 나타나게 되었음을 확인할 수 있었다.

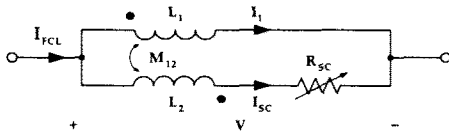


그림 4. 자속구속형 초전도 한류기의 등가회로

그림 4는 자속구속형 초전도 한류기의 등가회로도이다. 코일의 턴수로 인덕턴스 조절이 가능하며, 코일 1, 2에 인가되는 전압의 크기도 설정할 수 있다. 이와 같은 구조로부터 감극결선의 등가회로 관계식인

$$I_{FCL} = I_1 + I_{sc} \quad (1)$$

$$V_1 = V_{sc} - V_2 \quad (2)$$

$$V_1 = j\omega L_1 \cdot I_1 - j\omega M_{12} \cdot I_{sc} \quad (3)$$

$$V_2 = -j\omega M_{12} \cdot I_1 + (j\omega L_2 + R_{sc}) \cdot I_{sc} \quad (4)$$

과 같은 관계식을 유도할 수 있다. 상쇄되어 있던 자속이 급격한 과도전류로 인한 시간변화에 대한 전류변화가 쇄교자속을 방해하여, 각 코일에 전압을 유기하여 사고전류를 제한한다. 하지만, 개방철심인 경우 누설자속으로 인하여, 식(4)에서 상호 인덕턴스의 양이 적어지기 때문에 2차측 초기에 코일의 양단에 걸리는 전압은 음의 방향으로 증가하게 된다. 즉, 누설자속을 제외한 교류자속에 의해 인가되는 코일 양단의 전압차에 영향을 받게 되어 소자전압의 인가되는 초기 동작시간이 증가하게 됨으로써, 한류소자에 양단에 인가되는 전압발생이 늦어졌다고 사료된다.

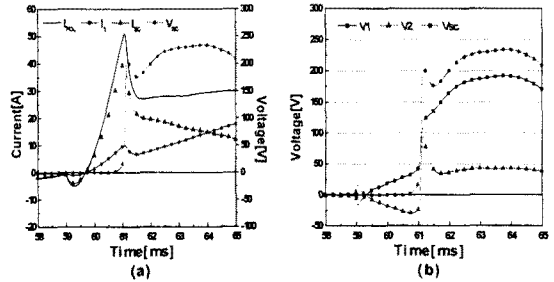


그림 5. 280[V]전압 인가시 사고발생 후 전류전압곡선
a) 전압전류곡선 b) 전압곡선

그림 5는 전원전압 280[V_{rms}]에 따른 사고발생 직후의 사고각 0°에서 초기반주기 동안의 과도전압전류파형을 나타낸다. 전원전압의 상승으로 초기 반주기 사고전류의 크기는 200[V_{rms}]때 49.72[A]에서 280[V_{rms}]는 51.06[A]로 증가하였다. 그에 따라 전류의 기울기도 미세한 증가를 보였으나, 한류소자에 인가되는 전압이 그림 3에서는 반주기동안 첫 번째 피크점이 171.29[V_{rms}]까지 상승하다가 다시 감소하여, 약간의 증가를 보이지만, 그림 4의 한류소자에 인가되는 전압은 초기피크점이 209.02[V_{rms}]까지 상승하여 다시 감소하다가 오히려 233.91[V_{rms}]까지 증가하였다. 이는 누설자속에 의한 상호인덕턴스가 줄어들어, 자속구속형 한류기의 동작특성을 둔화시켜 소자에 제차 과전압을 인가함에 따라 한류소자의 부담이 증가하여 소자보호측면에서 악영향이 있을 것으로 사료된다. 또한 한류소자의 상전도 전이되는 속도가 늦어짐에 따라 소자에 기존의 페루프보다 더 많은 온도상승을 따른 문제점도 야기했을 것으로 사료된다.

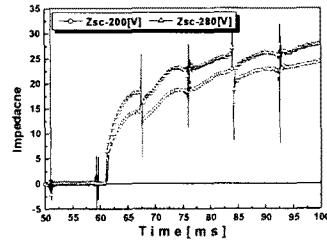


그림 6. 전원전압별 사고발생 후 임피던스 곡선

그림 6는 전원전압별로 한류소자의 양단에 발생하는 저항에 대한 임피던스 곡선을 나타낸다. 전원전압이 증가할수록 자속구속형 한류기의 응답특성으로 전압레벨에 따라 사고전류의 크기에 따라 특정한 추가기기의 설치없이 임피던스가 선로에 투입되어, 사고전류를 제한시킨다. 이는 기존의 페루프와 동작특성면에서는 유사하다.

강자성체 철심을 자속매체개로 사용함에 따라서 설계파라미터 조건시 유의해야할 점은 철심에 대한 어느 정도 이상의 자기화 진행시에 한계치에 인하여 유발되는 문제는 자기포화상태인 철심포화에 따른 부작용이다.

이러한 철심포화는 전압과 전류의 파형을 비선형적으로 만들어 전력손실을 유발시키며, 이에 따른 5,3,7,2조 순으로 높은 고조파를 만들어, 전력기에 수명 단축을 가져온다. 철심의 포화를 막기 위해서는 철심코어의 비포화영역에서 동작되어야 하는데, 이는 철심의 크기 증대를 유발하기 때문에 설치공간에 따른 제약과 전체시스템의 가격상승으로 인해 어느 일정수준의 설계조건이 요구된다. 다른 해결책으로써 고조파필터나 다른 고조파 발생이 없는 전용 선로를 묶어 사용해야 하는 어려움이 있다. 페루프 구조가 갖는 특성에 의해 사고시 발생하는

자장에 의해 상당한 진동을 보이는데, 개루프인 경우 부피 및 무게를 줄여주고, 철심간의 연결부위가 적어짐에 따라 사고시 발생하는 기계적인 진동을 줄일 수가 있었다. 이러한 방법은 개루프 구조가 강자성체 철심에 공심이 투입되어 철심의 포화를 어느정도 해결할 수 있기 때문에 자속구속형 초전도한류기의 개루프 설계에 대한 실험을 진행한 것이다.

3. 결 론

본 논문에서는 YBCO박막을 사용한 자속구속형 초전도한류기를 설계하여 개루프인 강자성체철심에 코일을 감극으로 결선하여 이에 따른 전류제한특성을 비교·분석하였다. 정상 작동시 철심에 의한 손실이 없으나, 사고시에는 자속에 의해 자속구속형 한류기가 동작함에 따라 철심의 영향력에 대한 설계파라미터 조건실험은 중요하다. 철심에 대한 설계는 적절하지 않는 경우 철심포화로 인한 문제가 수반되므로, 전원전압별 인가조건의 파라미터에 의한 사고전류제한 동작특성을 실험하였다.

전원전압의 점진적 증가에 따른 감극결선인 경우 기존 페루브의 과도전류를 제한하는 동작특성면에서는 유사하였으나, 소자양단에 인가되는 전압이 발생되는 동작시점이 늦어짐을 확인할 수 있었다. 또한 이러한 둔화된 동작특성으로 인하여 개루프인 경우가 초전도체의 열분산을 둔화시켜 한류소자의 온도상승을 야기하여 소자보호 측면에서 불리하다고 사료된다. 개루프인 철심구조로 인해 사고발생시 상호인덕턴스의 양이 줄어들면서, 자속구속형 구조에 영향을 주어 2차측에 결선된 코일 2인 경우 인가되는 전압을 음의 방향으로 증가시켰다. 또한 초기 과도전압의 인가가 최고피크치까지 상승하다가 감소되는 동작을 하였으나, 다시 상승하여 과도응답 특성이 발생했음을 알 수 있었다. 또한 임계전류 이상의 과도한 전류가 초전도체에 흘러 상전도체 저항에 의해 사고전류가 제한이 되어 초기피크선로전류가 감소가 되었으나, 반주기동안의 곡선에서 임계전류크기만큼의 전류높이를 보여줌으로써 전류제한 특성에서 적절한 설계가 필요하다는 것을 알 수 있었다. 이에 따라 개루프 철심인 경우 켄치동작과 소자 부담측면에서는 적합한 설계조건이 필요함을 확인할 수 있었다. 하지만, 개루프철심을 이용할 경우 철심포화를 둔화시킬 수 있으며, 철심코어의 비포화영역에서의 동작을 위한 크기증대가 설치장소에 따른 제약이 수반되므로, 적절한 설계파라미터에 따른 안정시 응용될 수 있는 구조라고 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김준환, 이강완, "전력계통, 고장전류 증대와 대응방안", 전기저널, p. 19-31, 1998.
- [2] 박형민, 임성훈, 박충렬, 최효상, 한병성, "자속구속형과 저항형 초전도 전류제한기의 특성비교", 전기전자재료학회논문지, Vol. 18, No. 4, p. 365, 2005.
- [3] T. Matsumura, T. Uchii, and Y. Yokomizu, "Development of flux-lock-type fault current limiter with high-Tc superconducting element", IEEE Trans. Appl. Supercon., Vol. 7, No. 2, p. 1001, 1996.